



Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão

J.A.O. Barros⁽¹⁾; J.M.Sena-Cruz⁽²⁾; S.J.E. Dias⁽²⁾; D.R.S.M. Ferreira⁽²⁾; A.S. Fortes⁽²⁾

*⁽¹⁾Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Escola Engenharia, Universidade do Minho
email: barros@civil.uminho.pt*

*⁽²⁾Aluno de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Escola Engenharia, Universidade do Minho
emails: jsena@civil.uminho.pt; sdias@civil.uminho.pt; debora@ipb.pt; fortesas@terra.com.br*

Universidade do Minho, Escola de Eng^a, Departamento Eng^a Civil, Azurém, 4810-058 Guimarães, Portugal

Resumo

Nos últimos anos tem sido crescente a utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão armado. Para tal contribui as melhores propriedades mecânicas destes materiais, a sua maior resistência à acção de agentes agressivos e a sua maior leveza e facilidade de aplicação, quando se tem por base de comparação materiais convencionais tais como o aço e o betão. No Subgrupo de Estruturas do Departamento de Eng^a Civil da Escola de Eng^a da Universidade do Minho tem-se efectuado investigação experimental e numérica no âmbito da utilização de laminados em fibra de carbono (CFRP) no reforço de estruturas de betão. Estes materiais compósitos têm sido utilizados no reforço à flexão e ao corte de pilares e vigas. A ligação CFRP-adesivo-betão tem sido caracterizada por forma a ser estabelecida a lei que define a transferência de tensões entre os materiais constituintes desta ligação, lei esta a ser implementada num modelo de interface, no quadro do método dos elementos finitos.

Os resultados mais significativos obtidos na investigação efectuada são apresentados no presente trabalho.

1 Introdução

A utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) na reparação e reforço estrutural tem aumentado continuamente nos últimos anos. Para tal não é alheio o facto de, em comparação com materiais tradicionais, os FRP serem mais leves, de mais fácil e rápida aplicação, mais resistentes à agressividade do meio ambiente e possuírem maior resistência à tracção (ACI Committee 440 (2002), CEB-FIP (2001)).

Os laminados e as mantas de FRP são geralmente aplicados nas faces dos elementos a reforçar, utilizando-se a técnica designada por reforço externo, TRE. A investigação que tem sido efectuada revela que esta técnica não permite mobilizar a capacidade resistente total dos FRP, dado ocorrer o seu descolamento precoce, (Nguyen *et al.* (2001), Mukhopadhyaya and Swamy (2001)). Como os FRP ficam directamente expostos às condições ambientais, a influência negativa dos ciclos de gelo-degelo (Toutanji and Balaguru (1998)) e das temperaturas baixas e elevadas (Pantuso *et al.* (2000)) na eficácia de reforço proporcionada por estes materiais deve ser tida em conta. Além disto, os reforços aplicados segundo a TRE ficam expostos directamente à acção do fogo e a actos de vandalismo.

Na tentativa de evitar estes inconvenientes, novas técnicas de reforço têm sido propostas. Uma das mais promissoras baseia-se na inserção de varões de fibras de vidro ou carbono em rasgos efectuados no betão de recobrimento (De Lorenzi *et al.* (2000a)). Os varões são fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxi. Esta técnica tem sido usada em aplicações práticas (Warren (1998), Alkhrdaji *et al.* (1999), Hogue *et al.* (1999), Tumialan *et al.* (1999), Warren (2000), Emmons *et al.* (2001)), sendo-lhe atribuídos benefícios técnicos e económicos.

Com o mesmo objectivo, Blaschko and Zilch (1999) propuseram uma técnica de reforço baseada na inserção de laminados de fibras de carbono (CFRP) no betão de recobrimento das peças a reforçar. Apesar do reduzido número de ensaios efectuados por estes investigadores, os resultados revelaram que a técnica proposta é promissora. No presente trabalho, uma técnica de reforço, similar à proposta por estes autores, é aplicada para duplicar a capacidade de carga de vigas de betão armado com rotura por flexão.

Apesar de Blaschko and Zilch (1999) terem revelado que a utilização de laminados inseridos em rasgos efectuados no betão de recobrimento pode aumentar significativamente a resistência à flexão de elementos de betão, esta técnica ainda não tinha sido aplicada no reforço à flexão de pilares. Assim, um dos objectivos do presente trabalho foi avaliar os benefícios desta técnica de reforço em elementos de pilar submetidos a carga axial constante de compressão e carregamento cíclico horizontal de amplitude crescente.

CFRP aplicado segundo a TRE tem também sido utilizado para aumentar a resistência ao corte de vigas de betão (Taerwe *et al.* (1997); Chaallal (1997); Triantafyllou (1998)). Contudo, a precoce perda de fixação dos CFRP ao betão não permite mobilizar o potencial de reforço que estes materiais dispõem. Na tentativa de aumentar a eficácia de reforço neste tipo de estruturas, De Lorenzis *et al.* (2000b) utilizaram varões de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das peças a reforçar ao corte, tendo-se registado aumentos significativos na capacidade de carga das vigas reforçadas. Adoptando-se procedimentos de reforço semelhantes, mas utilizando faixas de laminado de CFRP (LS-CFRP) inseridas em finos rasgos, em vez de varões introduzidos em

rasgos, foi efectuada uma campanha de ensaios com o objectivo de se avaliar a eficácia desta técnica, no reforço ao corte de vigas de betão, que é mais rápida e fácil de aplicar.

A ligação entre o laminado de CFRP e o betão de recobrimento envolvente foi investigada por intermédio de ensaios de arrancamento. A influência do comprimento de aderência e da resistência do betão no comportamento da ligação foi estudada.

Os principais resultados da investigação experimental efectuada são apresentados e analisados.

2 Técnica de reforço

A técnica de reforço que se propõe no presente trabalho é composta pelos seguintes principais procedimentos (ver Figura 1):

- Rasgos de 4 a 5 mm de largura e 12 a 15 mm de profundidade são executados na face dos elementos a reforçar;
- Os rasgos são limpos por intermédio da aplicação de ar comprimido;
- As faixas de laminado de CFRP (LS-CFRP) são limpas com acetona;
- Adesivo epoxi é produzido segundo as recomendações do fabricante;
- Os rasgos são preenchidos com o adesivo epoxi;
- Adesivo epoxi é aplicado nas faces dos LS-CFRP;
- Os LS-CFRP são introduzidos nos rasgos e o adesivo em excesso é removido.

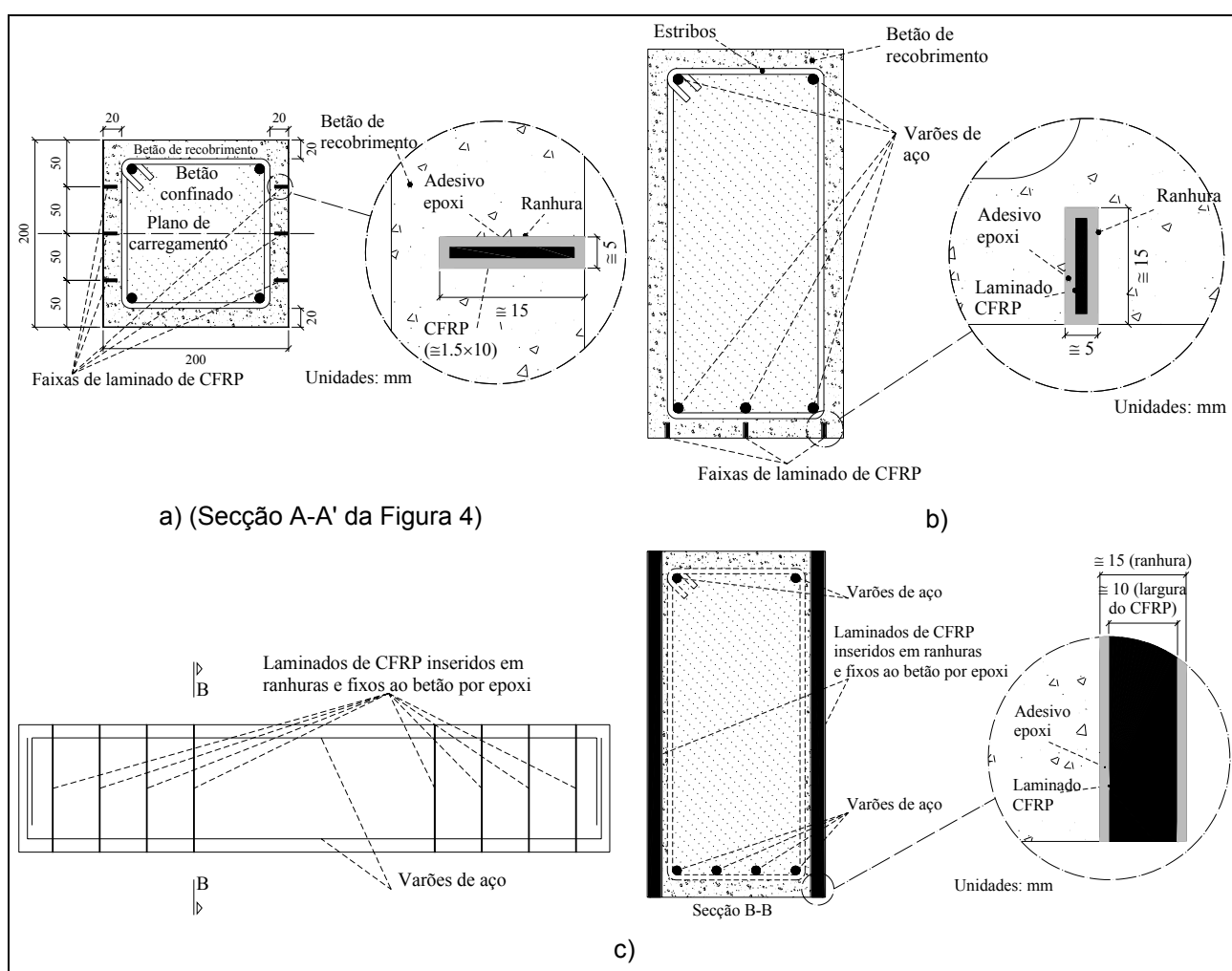


Figura 1 - Técnica de reforço aplicada a: a) pilares que rompem por flexão; b) vigas que rompem por flexão; c) vigas que rompem por corte.

Entre a aplicação do reforço e o ensaio da peça reforçada mediou um período superior a cinco dias, por forma a garantir-se uma adequada cura do adesivo. Procedimentos específicos às diferentes campanhas de ensaios efectuadas serão oportunamente descritos.

3 Propriedades dos constituintes dos sistemas de CFRP utilizados

3.1 Introdução

Segundo o fabricante, os CFRP e os adesivos epoxi utilizados na presente investigação deveriam ter as propriedades indicadas na Tabela 1 (Bettor MBT (1999)). A manta, *MBrace C5-30*, somente foi utilizada na campanha de ensaios relativa ao reforço ao corte de vigas de betão. As LS-CFRP foram obtidas por corte de laminados designados por *MBrace Laminates LM*, efectuado pelo fabricante. Para validar alguns dos valores da Tabela 1 foram efectuados ensaios experimentais.

Tabela 1 - Propriedades dos CFRP utilizados.

CFRP		Propriedades principais			
Tipo	Material	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Extensão última (‰)	Espessura (mm)
Manta MBrace C5-30	Primário	12	0.7	30	-
	Epoxi	54	3	25	-
	Manta	3000	390	8	0.167
Laminado MBrace LM	Adesivo epoxi	-	7	-	-
	Laminado	2200	150	14	1.4

3.2 Laminados de CFRP

Todas as LS-CFRP utilizadas no presente trabalho foram fornecidas em rolos e tinham secção transversal de 9.59 ± 0.09 mm de largura por 1.45 ± 0.005 mm de espessura. Contudo, as LS-CFRP aplicadas no reforço dos pilares tinham um comportamento à tracção diferente do comportamento das LS-CFRP utilizadas nas restantes campanhas de ensaios. Ensaio de tracção uniaxial efectuados segundo as recomendações da ISO 527-5, (1997) com provetes das LS-CFRP utilizadas no reforço dos pilares indicaram que estes compósitos dispunham de um módulo de Young de 159000 N/mm^2 e uma resistência média à tracção de 1741 N/mm^2 (Sena-Cruz *et al.* (2001)). Os ensaios de tracção uniaxial efectuados com provetes das restantes LS-CFRP indicaram tratar-se de um compósito com um módulo de Young de 159000 N/mm^2 , uma resistência média à tracção de 2740 N/mm^2 , e uma extensão última de 17.0 ‰ (Sena-Cruz e Barros (2002a)).

3.3 Adesivo epoxi

Ensaio efectuados segundo as recomendações da ISO 527-3 (1997) revelaram que o adesivo epoxi utilizado para fixar as LS-CFRP ao betão tinha um valor médio de módulo de Young de 5000 N/mm^2 e valores de resistência à tracção variando entre 16 N/mm^2 e 22 N/mm^2 (Sena-Cruz e Barros (2002a)).

4 Reforço à flexão de pilares

4.1 Séries de testes

Em Portugal, no projecto de estruturas, a acção sísmica só passou a ser considerada, de forma sistemática e sob metodologias regulamentares, a partir dos anos 80, pelo que existe um número elevado de estruturas construídas antes daquela data susceptíveis de sofrerem danos consideráveis, caso sejam submetidas a um sismo de moderada/elevada

intensidade. Em geral, os pilares são os elementos estruturais que requerem maior cuidado no que se refere à sua segurança e estabilidade, dado que, na maior parte dos casos, o seu colapso conduz à ruína da estrutura que suporta. Para avaliar a eficácia da técnica de reforço proposta, em elementos submetidos a compressão axial constante e carga horizontal cíclica, as séries de pilares de betão armado indicadas na Tabela 2 foram ensaiadas. A série SR é composta por pilares não reforçados, a série PR é constituída por pilares que foram reforçados antes de serem ensaiados, e a série CR é composta pelos pilares ensaiados da série SR, reforçados posteriormente e ensaiados novamente. Cada pilar é designado por Pnm_s , em que n representa o diâmetro, em mm (10 ou 12), da armadura convencional longitudinal, m pode ser a ou b , dado que havia dois provetes para cada percentagem de armadura convencional longitudinal, e s designa a série a que o pilar pertence (SR, PR ou CR).

Tabela 2 - Designações atribuídas aos elementos de pilar.

Armadura longitudinal	Série		
	SR ¹	PR ²	CR ³
4 ϕ 10	P10a SR	P10a PR	P10a CR
	P10b SR	P10b PR	P10b CR
4 ϕ 12	P12a SR	P12a PR	P12a CR
	P12b SR	P12b PR	P12b CR

¹ não reforçado; ² reforçado antes de ser ensaiado; ³ reforçado após ensaios preliminares.

4.2 Equipamento e procedimentos de ensaio

Na Figura 2 incluiu-se um esquema e uma foto do sistema de ensaio utilizado. Um provete era constituído pelo pilar propriamente dito, ligado monoliticamente a uma sapata que, por sua vez, era fixada a um bloco de fundação, por intermédio de quatro varões de aço. O pilar era submetido a uma carga vertical constante de 150 kN que introduzia no pilar uma tensão de compressão de 3.75 N/mm².

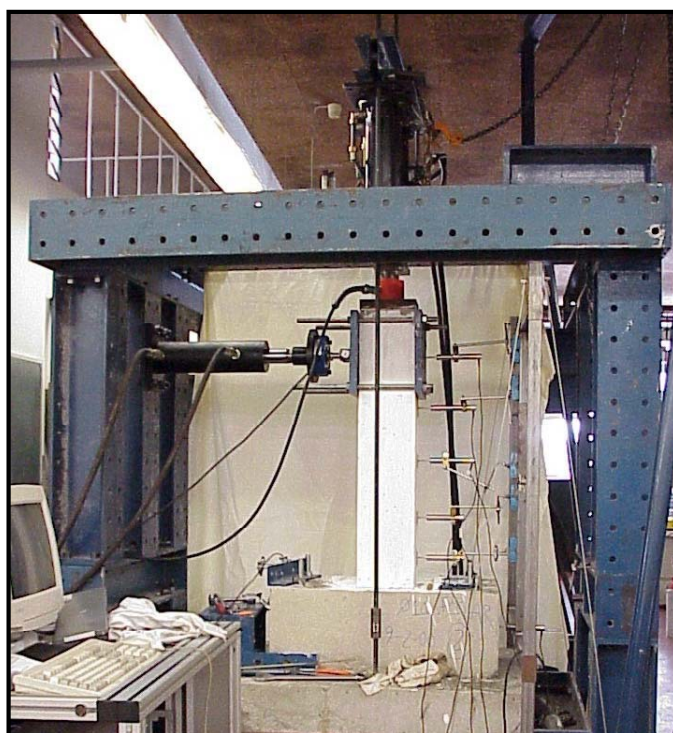
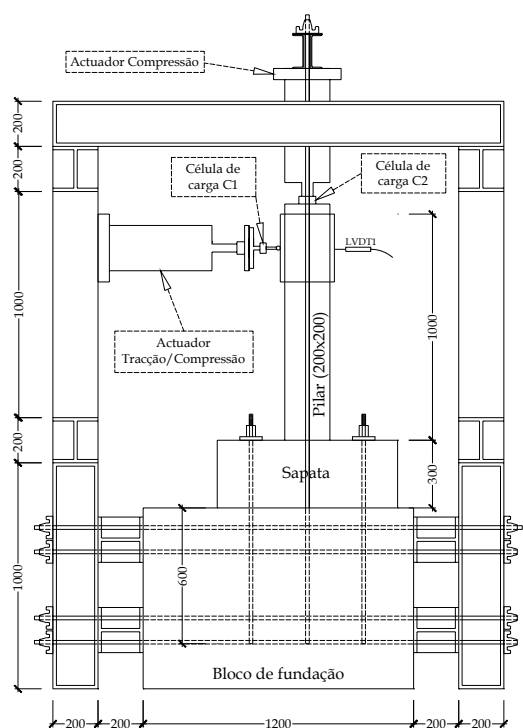


Figura 2 - Sistema de ensaio (dimensões em milímetros).

As forças instaladas eram registadas por intermédio de células de carga, enquanto os deslocamentos eram lidos em LVDT's, dispostos de acordo com o esquema representado

na Figura 3. Nesta Figura também se indica o posicionamento de extensómetros, colados nas LS-CFRP para avaliar as extensões que se desenvolveram nestes materiais de reforço. Os ensaios foram efectuados com um sistema servo-controlado. O carregamento era constituído por oito ciclos de deslocamentos desde ± 2.5 mm até ± 20.0 mm, em incrementos de ± 2.5 mm, à velocidade de deformação de $150 \mu\text{m/s}$, tendo o controlo sido efectuado por intermédio do LVDT1, (Ferreira (2000)).

4.3 Materiais

Para se reproduzir o comportamento de pilares de betão armado de edifícios construídos antes dos anos 80, utilizou-se um betão de baixa classe de resistência e varões de aço de superfície lisa e resistência moderada. Para ancorar as LS-CFRP ao bloco de fundações do pilar foi utilizada uma argamassa epoxi.

4.3.1 Betão

Ensaio de compressão efectuados com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura indicaram que o betão utilizado nos pilares teve uma resistência média à compressão de 16.7 N/mm^2 aos 28 dias (C12/16). Ensaio de flexão forneceram valores médios de 2.62 N/mm^2 e 0.08 N.mm/mm^2 para a resistência à tracção em flexão e para a energia de fractura, respectivamente (Ferreira (2000)).

4.3.2 Armaduras convencionais

Para caracterizar o comportamento das armaduras utilizadas nos pilares foram efectuados ensaios de tracção uniaxial segundo as recomendações da Norma Europeia EN 10002-1 (1990). A tensão de cedência (f_{sy}) e de rotura (f_{su}) e o módulo de Young (E_s) dos varões $\phi 6$, $\phi 10$ e $\phi 12$ foram (média de três provetes): $f_{sy} = 352.4 \text{ N/mm}^2$, $f_{su} = 532.8 \text{ N/mm}^2$, $E_s = 203700 \text{ N/mm}^2$ ($\phi 6$); $f_{sy} = 323.3 \text{ N/mm}^2$, $f_{su} = 456.5 \text{ N/mm}^2$, $E_s = 217000 \text{ N/mm}^2$ ($\phi 10$); $f_{sy} = 364.8 \text{ N/mm}^2$, $f_{su} = 518.8 \text{ N/mm}^2$, $E_s = 229700 \text{ N/mm}^2$ ($\phi 12$).

4.3.3 Argamassa epoxi

A argamassa epoxi utilizada para ancorar as LS-CFRP à fundação do pilar era constituída por uma parte de epoxi e três partes de areia fina, previamente lavada e seca (partes medidas em peso). Provetes desta argamassa foram ensaiados segundo a Norma Europeia EN 196-1 (1996), tendo-se obtido uma resistência média à compressão de 51.7 N/mm^2 e uma resistência média à tracção em flexão de 35.4 N/mm^2 , aos 28 dias.

4.4 Procedimentos específicos de reforço

As Figuras 3 e 4 ilustram a técnica de reforço adoptada nos pilares. Em ambas as faces solicitadas do pilar, foram efectuados rasgos para inserção das LS-CFRP. Nestas faces, na base do pilar, uma camada de 100 mm a 150 mm de betão de recobrimento foi removido. Na fundação do pilar e no alinhamento dos rasgos foram efectuados furos de aproximadamente 100 mm de profundidade, para ancoragem das LS-CFRP. Os rasgos e os furos foram limpos com escova de aço e ar comprimido. De seguida, os rasgos foram preenchidos com adesivo epoxi e, quer os furos na sapata, quer a zona de betão de recobrimento removido foram preenchidos com argamassa epoxi. Para um maior detalhe dos procedimentos de reforço remete-se o leitor para (Ferreira (2000)).

4.5 Resultados

Nesta secção apresentam-se resultados representativos dos obtidos na campanha de ensaios. Análise detalhada pode ser encontrada em (Ferreira (2000)).

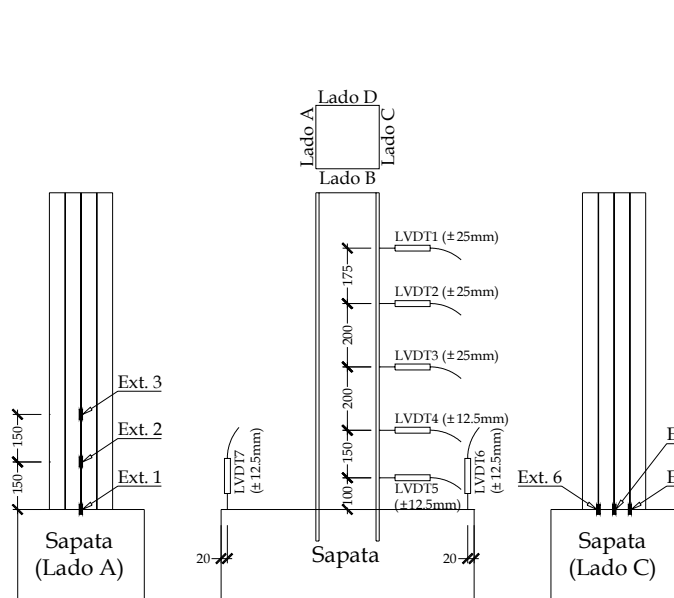


Figura 3 - Localização dos transdutores de deslocamentos, LVDT's, e dos extensômetros, ext (dimensões em milímetros).

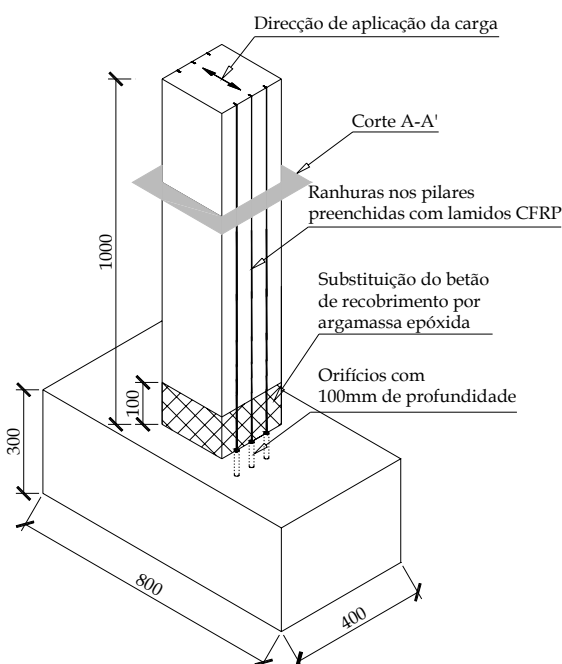


Figura 4 - Técnica de reforço aplicada nos pilares (dimensões em milímetros).

4.5.1 Capacidade de carga

As forças máximas de compressão e de tracção obtidas nos ensaios estão indicadas nas Tabelas 3 e 4. A diferença registada nas forças máximas em pilares das mesmas séries deve-se, fundamentalmente, à variação na resistência do betão (foi necessário mais do que duas betonagens para moldar cada provete) e a desalinhamentos nas armaduras convencionais. Tomando por base de comparação os resultados obtidos na série de pilares não reforçados (série SR), constata-se que o reforço proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga dos pilares das outras duas séries (PR e CR). A comparação entre os pilares das séries SR e PR deve ser efectuada com cuidado, dado que a resistência à compressão do betão destes pilares não foi a mesma. Como a percentagem de LS-CFRP foi mantida constante em toda a campanha de ensaios, o aumento da capacidade de carga foi maior nos pilares com menor percentagem de armadura convencional. O aumento de capacidade de carga nos pilares "virgens" (série PR) e nos pilares previamente testados (série CR) foi similar.

Tabela 3 - Forças máximas obtidas nas séries PR (reforçados antes de serem ensaiados).

Tipo de força	Série PR			
	P10a_PR [111]	P10b_PR [113]	P12a_PR [110]	P12b_PR [115]
Tracção (kN)	37.14	40.63	44.13	39.81
Compressão (kN)	-38.54	-37.96	-43.66	-36.64

Nota: Os valores entres parêntesis rectos representam a idade do pilar à data do ensaio.

Tabela 4 - Máxima força obtida nos pilares das séries SR (não reforçados) e CR (reforçados após terem sido previamente ensaiados).

Tipo de força	Séries	P10a	P10b	P12a	P12b
Tracção (kN)	SR (kN)	16.67 [86]	21.78 [85]	26.35 [85]	29.31 [85]
	CR (kN)	37.96 [146]	41.38 [130]	34.11 [150]	45.54 [154]
	Aumento (%)	127.7	89.99	29.45	55.37
Compressão (kN)	SR (kN)	-19.76 [86]	-24.07 [85]	-30.52 [85]	-32.27 [85]
	CR (kN)	-34.11 [146]	-43.1 [130]	-37.03 [150]	-41.58 [154]
	Aumento (%)	72.62	79.06	21.33	28.85

Nota: Os valores entres parêntesis rectos representam a idade do pilar à data do ensaio.

4.5.2 Relações força-flecha

Na Figura 5 apresenta-se a relação típica entre a força horizontal e o deslocamento no LVDT1 (ver também Figura 2). Como a presente técnica de reforço não introduz confinamento significativo no betão do pilar, a energia dissipada não varia significativamente (Barros *et al.* (2001)), mas o aumento da capacidade de carga é significativo, tal como pode ser também constatado na Figura 6, onde se representa uma envolvente típica do carregamento cíclico.

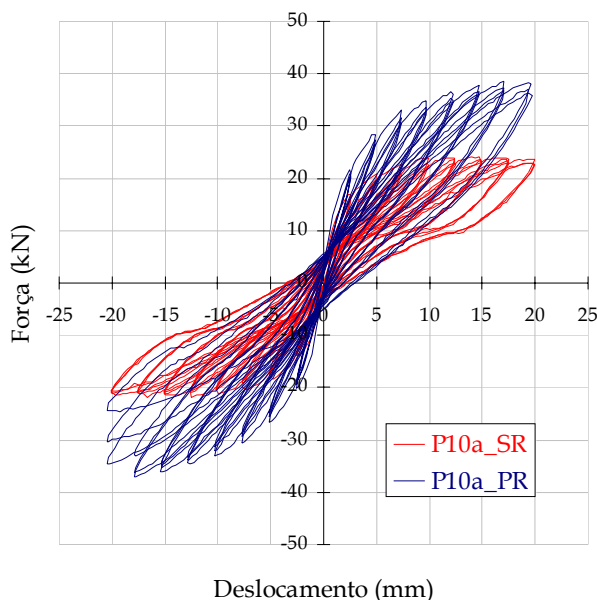


Figura 5 - Resposta cíclica força-deslocamento no pilar P10a.

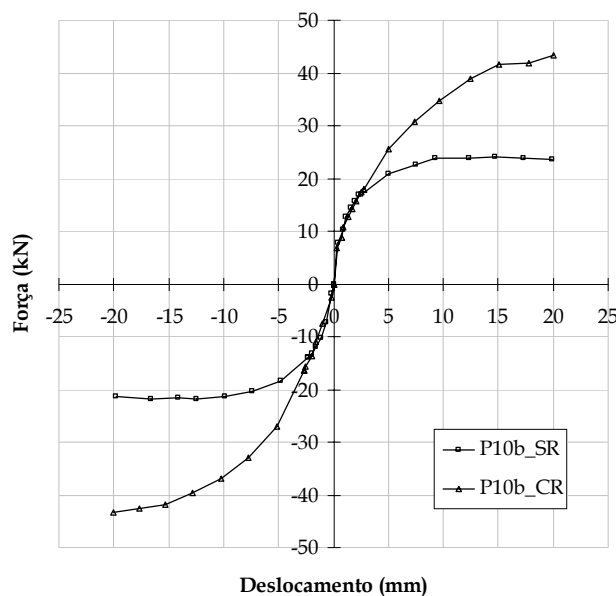


Figura 6 - Envolvente força-deslocamento de todos os carregamentos cíclicos no pilar P10b.

4.5.3 Relações força-extensão

Na maior parte dos pilares reforçados, nas LS-CFRP atingiram-se valores de extensão próximos do correspondente à extensão última deste compósito ($\approx 10000 \mu\text{m/m}$), tendo algumas rompido junto à principal fenda de rotura do pilar. A título de exemplo, na Figura 7 apresenta-se a relação entre a força horizontal e a extensão no extensómetro Ext6 (ver Figura 3), no pilar P10a_CR. Nos restantes pilares foram registadas relações similares nos extensómetros localizados na zona de rotura do pilar.

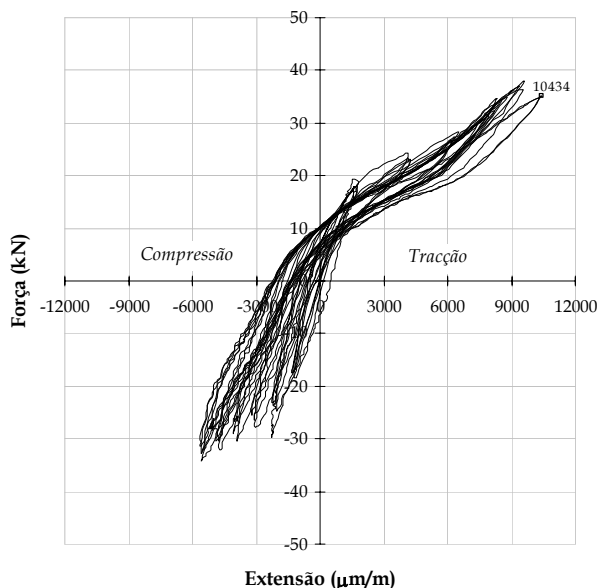


Figura 7 - Relação entre a força e a extensão no extensómetro Ext6 (ver Figura 3) no pilar P10a_CR.

5 Reforço à flexão de vigas

5.1 Séries de ensaios

Na Figura 8 representa-se a geometria das vigas, a disposição das armaduras convencionais e das LS-CFRP. O carregamento e as condições de suporte estão também esquematizados. A secção transversal das LS-CFRP (A_f) aplicadas em cada série foi determinada por forma a duplicar a carga de rotura das correspondentes vigas de referência (Fortes *et al.* (2002)). A percentagem de estribos utilizada foi a necessária para assegurar rotura por flexão. Na Figura 8, A_s é a secção transversal dos varões de aço dispostos na face inferior da viga.

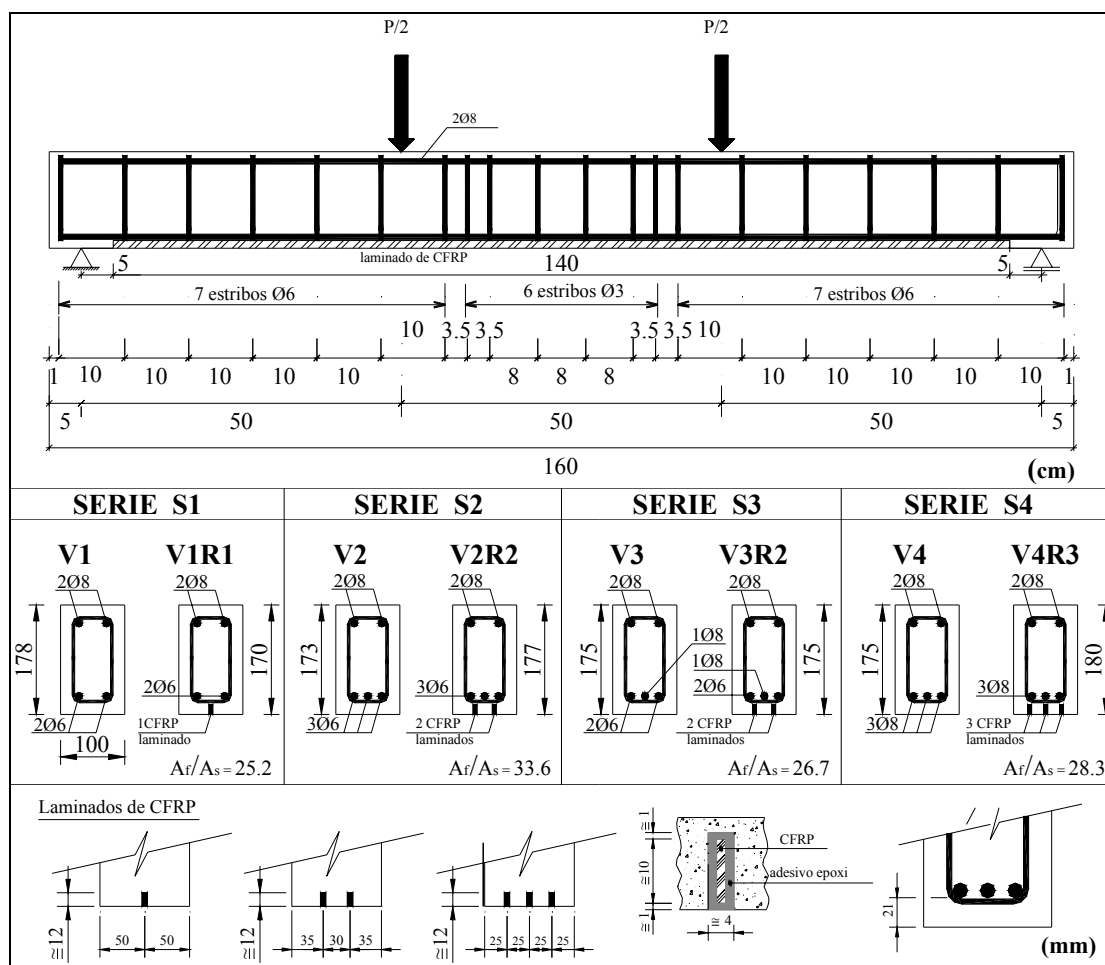


Figura 8 - Geometria, armaduras e reforço das vigas.

5.2 Propriedades do betão e das armaduras convencionais

A resistência à compressão do betão aplicado nas vigas foi determinada por intermédio de ensaios de compressão em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, tendo-se obtido uma resistência média de 46.1 N/mm² à idade das vigas à data do seu ensaio (90 dias).

A armadura convencional longitudinal era composta por varões de aço de 6 mm e 8 mm de diâmetro. Nos vãos de corte os estribos eram constituídos por varões de aço de 6 mm de diâmetro e, no vão central, por arames de 3 mm diâmetro. A tensão de cedência dos $\phi 6$ e $\phi 8$ foi de 750 MPa e 500 MPa, respectivamente, tendo ambos os tipos de varões tido comportamento elástico até à sua cedência, seguido de comportamento quase plástico (Barros e Fortes (2002)).

5.3 Equipamento e procedimentos de ensaio

Cada ensaio foi realizado sob controlo de deslocamento, à velocidade de 20 $\mu\text{m/s}$ até ser alcançada a rotura da viga. A deformação da viga foi medida por intermédio dos deslocamentos lidos em cinco LVDT's (ver Figura 9). As extensões longitudinais nas LS-CFRP foram registadas em três extensómetros (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).

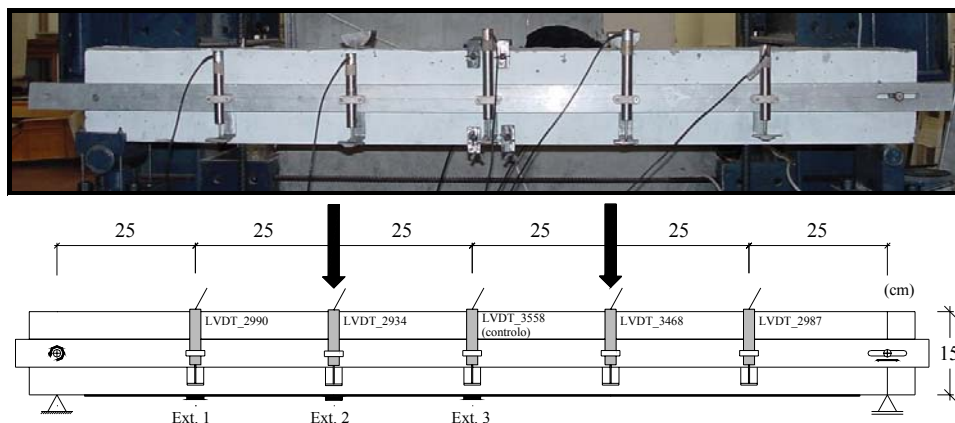


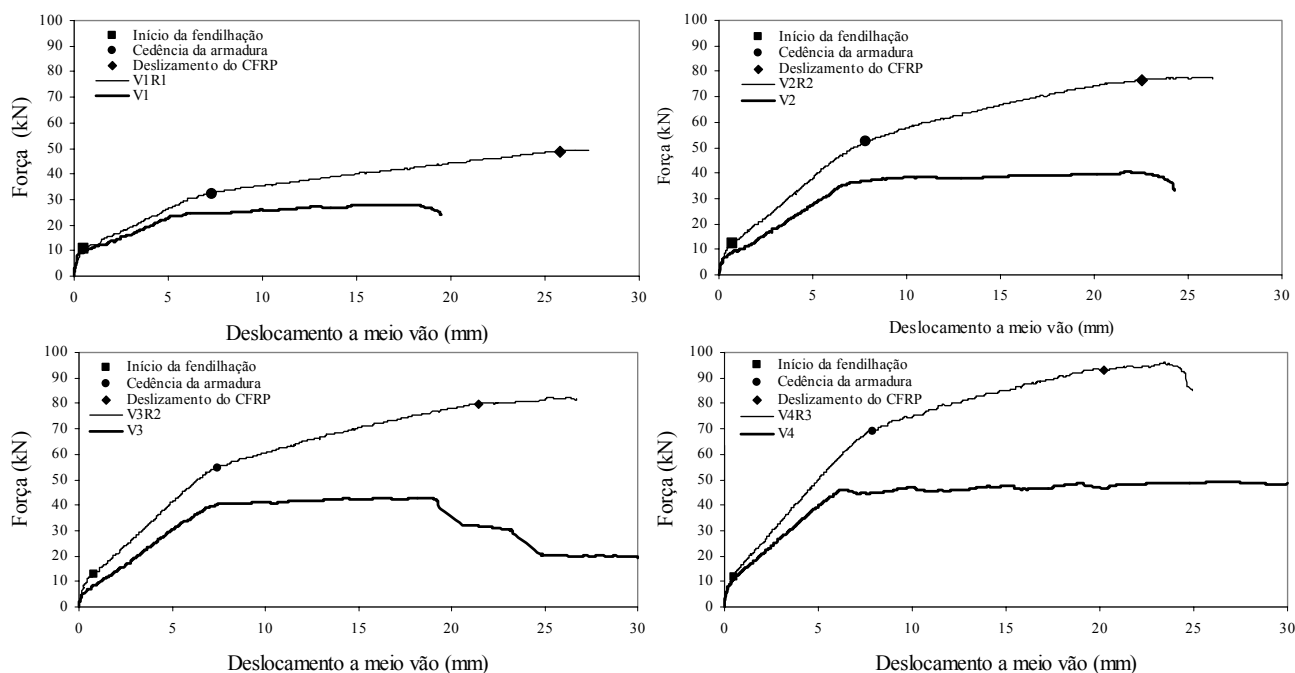
Figura 9 - Disposição dos LVDTs e dos extensómetros (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).

5.4 Resultados

Os modos de rotura e a interpretação dos mecanismos de reforço proporcionados pelas LS-CFRP estão expostos em outro trabalho (Fortes *et al.* (2002)).

5.4.1 Relações força-flecha

Os diagramas de carga vs deslocamento a meio vão estão representados na Figura 10, e os principais resultados estão incluídos na Tabela 5.



Verifica-se que o objectivo de duplicar a carga última das correspondentes vigas de referência foi praticamente alcançado. A carga correspondente ao início da cedência das

armaduras convencionais, P_{sy} , aumentou de 32% a 47%. O deslocamento correspondente a P_{sy} também aumentou. O aumento na carga de início da fendilhação, P_{cr} , foi maior que o registado quando se utilizam técnicas de reforço externo. A carga de serviço, P_{serv} (carga para a flecha de $L/400=3.75$ mm, em que L é o vão da viga), também aumentou, tendo sido de 45% o máximo incremento, valor este superior ao que geralmente se obtém com as técnicas de reforço externo.

Tabela 5 - Principais resultados registados nas séries de vigas reforçadas à flexão.

Série	Viga	P_{cr} (kN)	$\frac{P_{cr}(VR)}{P_{cr}(V)}$ ⁽¹⁾	P_{serv} (kN)	$\frac{P_{serv}(VR)}{P_{serv}(V)}$	P_{sy} (kN)	$\frac{P_{sy}(VR)}{P_{sy}(V)}$	P_u (kN)	$\frac{P_u(VR)}{P_u(V)}$	$\epsilon_{f,max}$ (‰)
S1	V1	8.5	1.26	18.6	1.22	24.5	1.32	28.2	1.78	15.5
	V1R1	10.7		22.7		32.31		50.3 ⁽²⁾		
S2	V2	8.1	1.52	21.7	1.45	37.5	1.39	41.0	1.91	12.8
	V2R2	12.3		31.4		52.28		78.5		
S3	V3	7.9	1.51	23.8	1.38	40.0	1.36	41.3	1.98	12.8
	V3R2	11.9		32.8		54.52		81.9		
S4	V4	8.1	1.74	32.3	1.25	46.9	1.47	48.5	1.96	10.6
	V4R3	14.1		40.4		69.11		94.9		

⁽¹⁾ VR – Viga reforçada; V – Viga de referência.

⁽²⁾ O ensaio foi cancelado quando a carga era de 50.3 kN e a flecha era superior a 25mm.

5.4.2 Relações força-extensão

As relações entre a carga aplicada e as extensões registadas nos extensómetros colados nas LS-CFRP (ver Figura 9) estão representadas na Figura 11. Os valores máximos de extensão, incluídos na Tabela 5 ($\epsilon_{f,max}$), variaram de 62% a 91% da extensão última das LS-CFRP ($\epsilon_{f,u} = 17$ ‰), revelando que a técnica de reforço utilizada é mais eficaz que as técnicas de reforço externo.

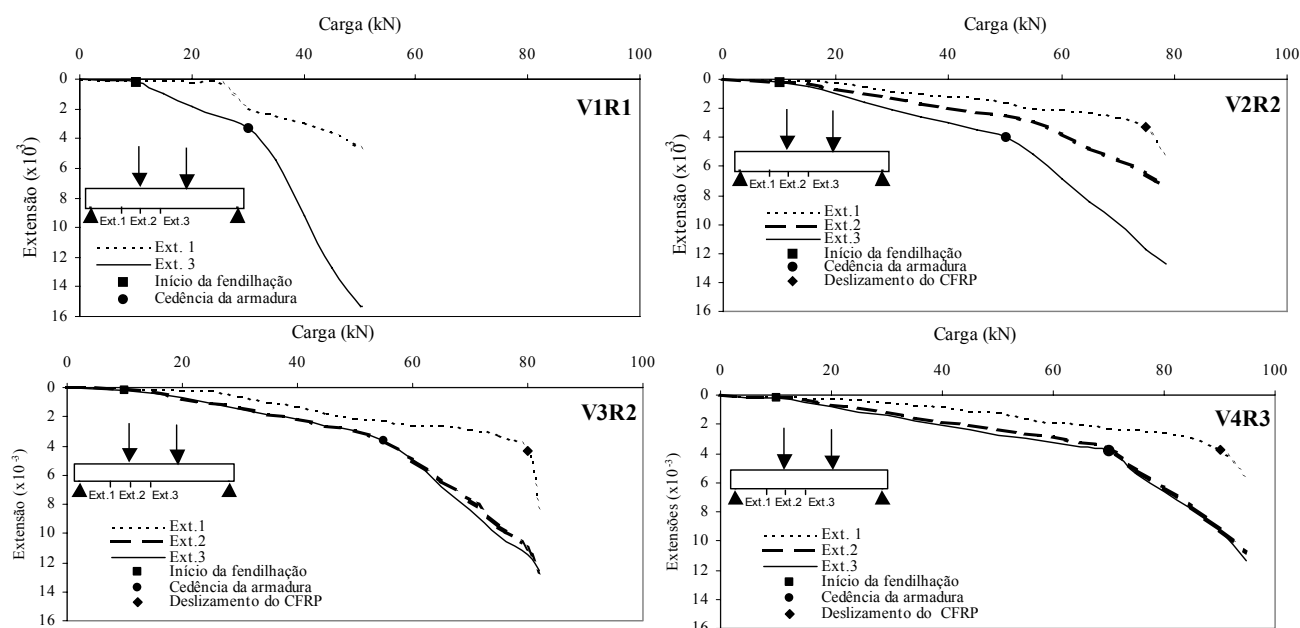


Figura 11 - Evolução das extensões nos laminados.

6 Reforço ao corte de vigas

6.1 Séries de ensaios

Três tipos de técnicas de reforço com CFRP foram utilizadas para avaliar a mais eficaz no reforço ao corte de vigas de betão armado (Dias e Barros (2003)). As séries de vigas testadas (ver Figura 12) eram compostas por uma viga de referência, sem qualquer tipo de reforço ao corte (VB10), uma viga com estribos em varão de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 0.15m nos vãos de corte (VBE-15), uma viga com faixas de duas camadas de manta de CFRP MBrace C5-30 (propriedades na Tabela 1) de 25 mm de largura e afastadas 0.08 m no vão de corte (VBM-8), uma viga com LS-CFRP inseridas (fixas com epoxi) em entalhes verticais efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga, afastadas de 0.10 m (VBCV-10), e uma viga com LS-CFRP inclinadas a 45°, fixas ao betão de forma similar às anteriores. A quantidade de CFRP de reforço ao corte foi determinada segundo as recomendações do ACI Committee 440 (2002), por forma a que todas as vigas reforçadas (inclusive a VBE-15) tivessem idêntica resistência ao corte e rompessem por corte.

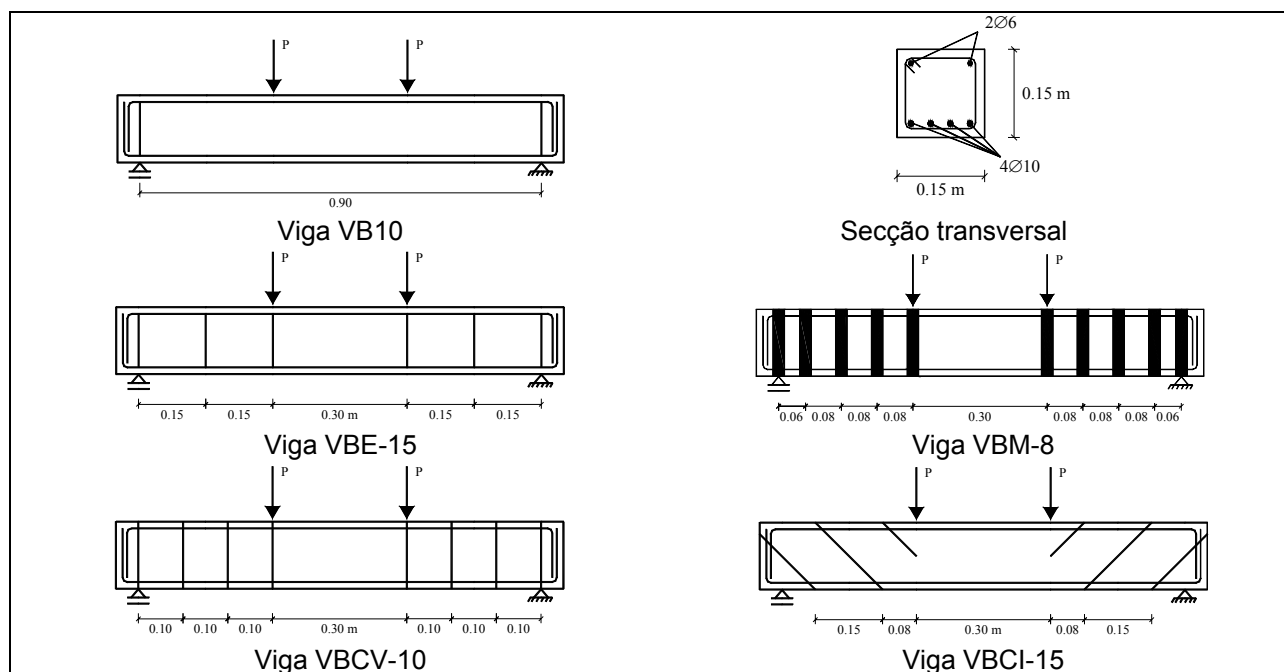


Figura 12 - Modelos VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15.

6.2 Propriedades do betão e das armaduras convencionais

Aos 28 dias e à idade dos ensaios das vigas, o betão tinha uma resistência média à compressão de 49.5 N/mm² e 56.2 N/mm², respectivamente. Os varões utilizados nos estribos e nas armaduras longitudinais da face superior e inferior da viga apresentaram para tensão de cedência e tensão de rotura os valores de 540/694 N/mm², 618/691 N/mm² e 464/581 N/mm², respectivamente.

6.3 Resultados

Na Figura 13 apresenta-se a relação entre a carga e o deslocamento a meio vão, registada nas vigas ensaiadas. Os principais resultados estão indicados na Tabela 6. Quando comparadas com a viga de referência (VB10), as vigas reforçadas com CFRP atingiram uma carga máxima (F_{max}) 50% a 77% mais elevada. O maior e o menor aumento foram registados na viga reforçada com LS-CFRP dispostas verticalmente (VBCV-10) e na viga reforçada com faixas de manta de CFRP (VBM-8), respectivamente.

Quando comparada com a viga armada com estribos em varão de aço (VBE-15), a viga reforçada com LS-CFRP verticais teve uma carga máxima 9% superior. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento registado sob a carga máxima (δ_p), verificou-se que, quando comparada com a flecha da viga de referência ($\delta_{p,VB10}$), a flecha para a carga máxima das vigas VBE-15, VBCV-10, VBCI-15 e VBM-8 foi 294%, 232%, 119% e 118% superior, respectivamente. Assim, $\delta_{p,VBCV-10}$ é 84% de $\delta_{p,VBE-15}$, revelando que a técnica de reforço adoptada não é somente eficaz em termos de aumentar a capacidade máxima de carga, como também em assegurar elevados níveis de ductilidade. O modo de rotura da viga VBCV-10 foi o menos frágil entre os modos de rotura de todas as vigas ensaiadas.

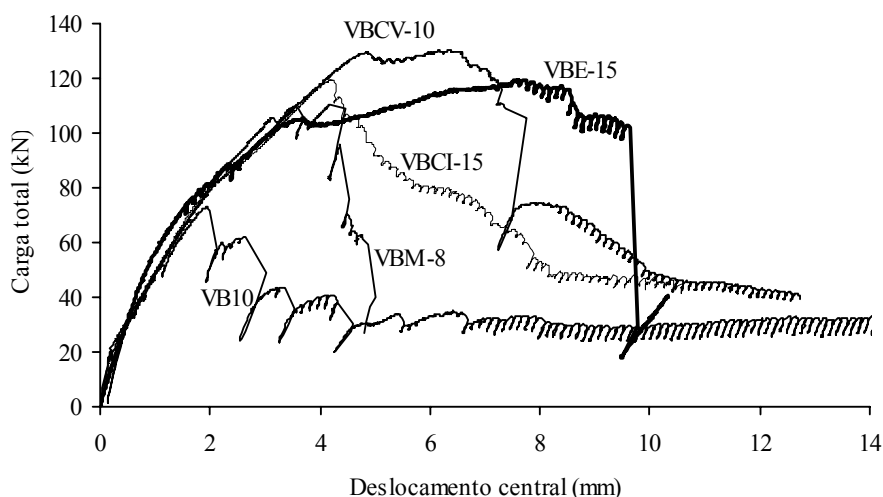


Figura 13 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas ensaiadas.

Tabela 6 - Principais resultados obtidos nas séries de vigas reforçadas ao corte.

Viga	Sistema de reforço ao corte	F_{\max} (kN)	$\frac{F_{\max}}{F_{\max,VB10}}$	$\frac{F_{\max}}{F_{\max,VBE-15}}$	δ_p (mm)	$\frac{\delta_p}{\delta_{p,VB10}}$	$\frac{\delta_p}{\delta_{p,VBE-15}}$
VB10	-	74.02	1.00	0.61	1.92	1.00	0.25
VBE-15	Estribos em varão de aço	120.64	1.63	1.00	7.57	3.94	1.00
VBM-8	Faixas de manta de CFRP	111.14	1.50	0.92	4.18	2.18	0.55
VBCV-10	LS-CFRP verticais	131.22	1.77	1.09	6.37	3.32	0.84
VBCI-15	LS-CFRP inclinados	120.44	1.63	1.00	4.21	2.19	0.56

7 Caracterização da ligação laminado-adesivo-betão

Com o objectivo de avaliar a influência da resistência do betão e do comprimento de aderência da LS-CFRP, no comportamento da ligação, com adesivo epoxi, entre LS-CFRP e betão, foram efectuadas campanhas de ensaios com três classes de betão e três comprimentos de aderência. Os principais resultados obtidos são apresentados nesta secção.

7.1 Provete e configuração de ensaio

A Figura 14 representa o provete, o carregamento e os instrumentos de medição de deslocamentos, forças e extensões utilizados. Todos os detalhes sobre a preparação dos provetes, e características dos equipamentos encontram-se em (Sena-Cruz e Barros (2002a)). No bloco B o laminado era fixo ao betão num comprimento total de 325 mm, enquanto no bloco A o laminado era apenas fixo no comprimento de aderência (L_a).

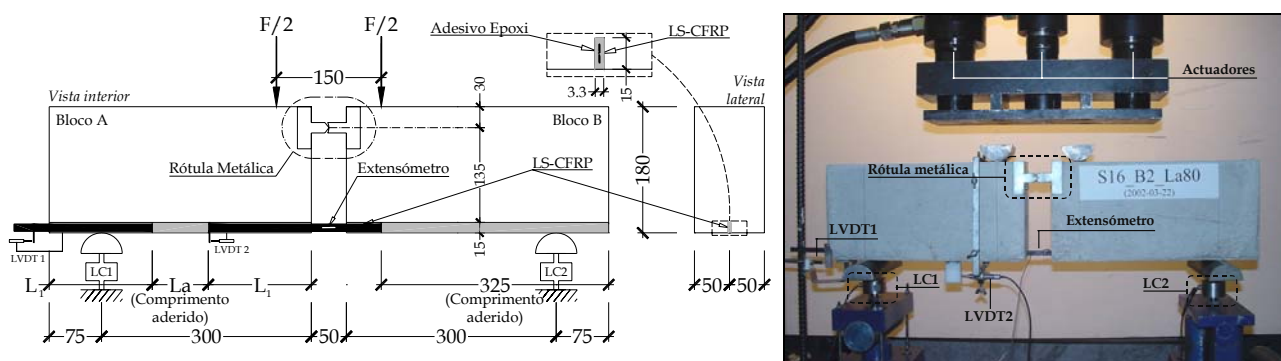


Figura 14 - Provete do ensaio de arranque em flexão.

7.2 Caracterização dos materiais

Para avaliar a influência da resistência do betão foram efectuadas três séries de provetes em betão de distinta classe de resistência: 35 MPa, 45 MPa e 70 MPa. A influência do comprimento de aderência do LS-CFRP foi obtida por intermédio de séries de provetes com 40 mm, 60 mm e 80 mm de comprimento de aderência. Assim, no total foram efectuadas nove séries de ensaios de arrancamento, cada uma constituída por três provetes. Para designar uma determinada série utilizou-se a sigla fcmXX_LaYY, em que XX representa a classe de resistência à compressão do betão, em MPa, e YY o comprimento de aderência da LS-CFRP, em mm. Em (Sena-Cruz e Barros (2002a)) encontram-se todos os detalhes relativos às composições e avaliação das propriedades dos betões.

7.3 Resultados

A influência da resistência do betão e do comprimento de aderência na relação entre a força de arrancamento e o deslizamento (deslocamento no transdutor LVDT2), $F-s_l$, está representada nas Figuras 15 e 16. A influência da resistência do betão e do comprimento de aderência na relação entre a tensão média de corte e o deslizamento (deslocamento no transdutor LVDT2), $\tau-s_l$, está representada nas Figuras 17 e 18. Nas Figuras 15 a 18, cada curva é a resposta média registada em três provetes.

A Tabela 7 inclui os valores médios das principais propriedades avaliadas com base nos resultados obtidos nos ensaios efectuados. Nesta Tabela, τ_{max} é o valor de pico da tensão média de corte, G_f é a energia dissipada no ensaio, representada pela área sob a curva tensão de corte – deslizamento, até um deslizamento de 5 mm. Por sua vez, ε_{fmax} é a extensão máxima registada no extensómetro colado ao laminado, ε_{fu} é a sua extensão de rotura ($\approx 17\%$), e δ_{Fmax} é o deslizamento correspondente à força máxima aplicada no ensaio.

Tabela 7 - Principais grandezas avaliadas (valores médios).

Grandeza	La40			La60			La80		
	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70
F_{max} (kN)	15	15.5	15.7	22.8	19.9	18.9	22.4	26.4	25.6
τ_{max} (MPa)	17.5	18.1	18.3	17.7	15.5	14.7	13.0	15.4	14.9
G_f (MPa.mm)	48.3	53.3	51.5	43.9	38.4	41.9	38.4	43.0	48.4
$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	42.1	43.5	44.0	64	55.8	52.9	62.1	73.9	71.6
δ_{Fmax} (mm)	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.7	0.8	0.7

Obs.: F_{max} – Força máxima no laminado; τ_{max} – Tensão máxima de corte; G_f – Energia dissipada; ε_{fmax} – deformação máxima atingida no laminado de CFRP; ε_{fu} – deformação na rotura do laminado de CFRP.

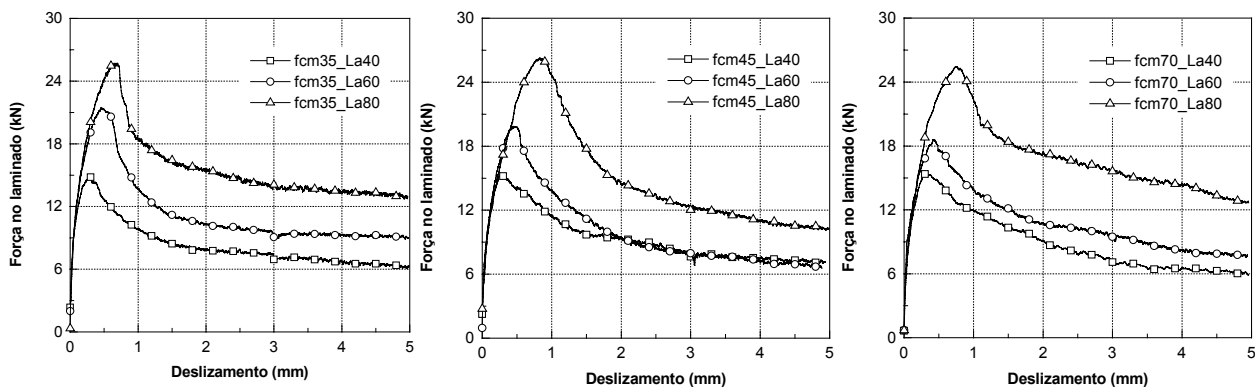


Figura 15 - Influência de fcm na relação força de arrancamento vs deslizamento.

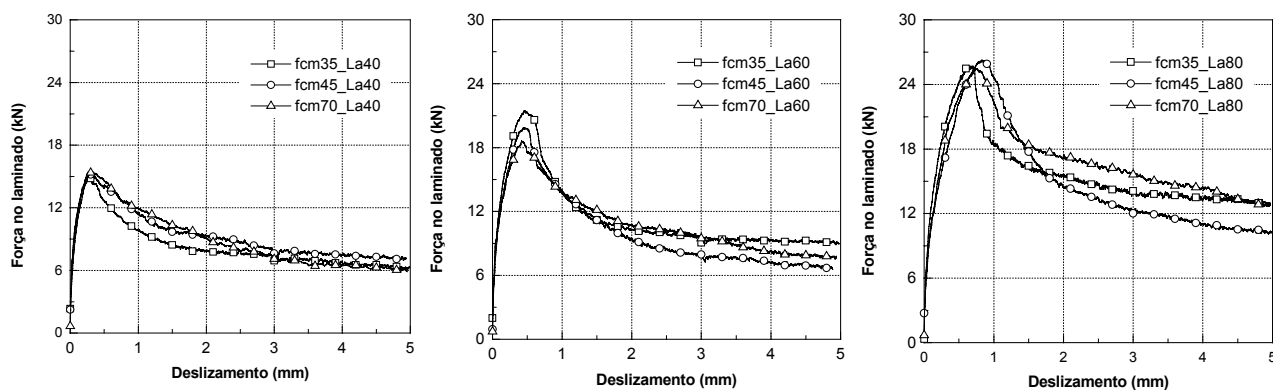


Figura 16 - Influência de La na relação força de arrancamento vs deslizamento.

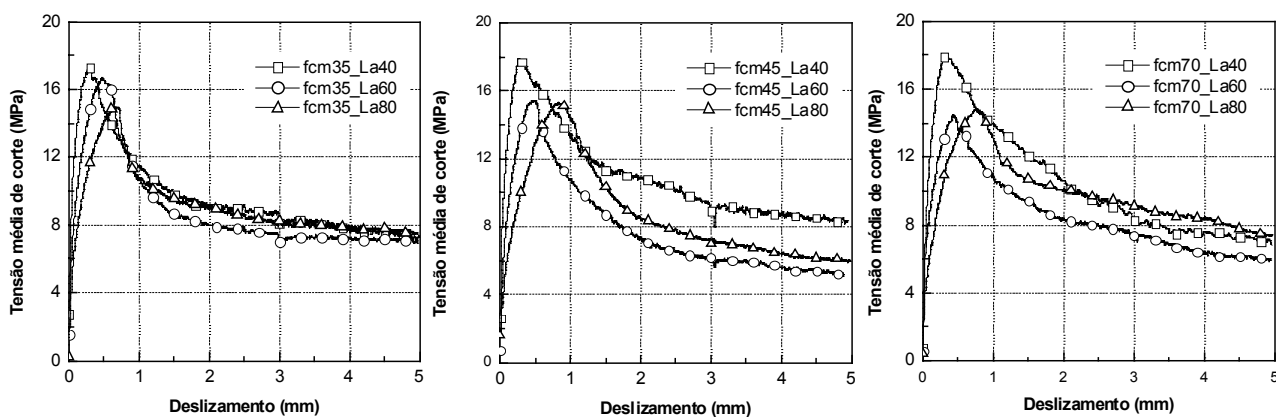


Figura 17 - Influência de fcm na relação tensão média de corte vs deslizamento.

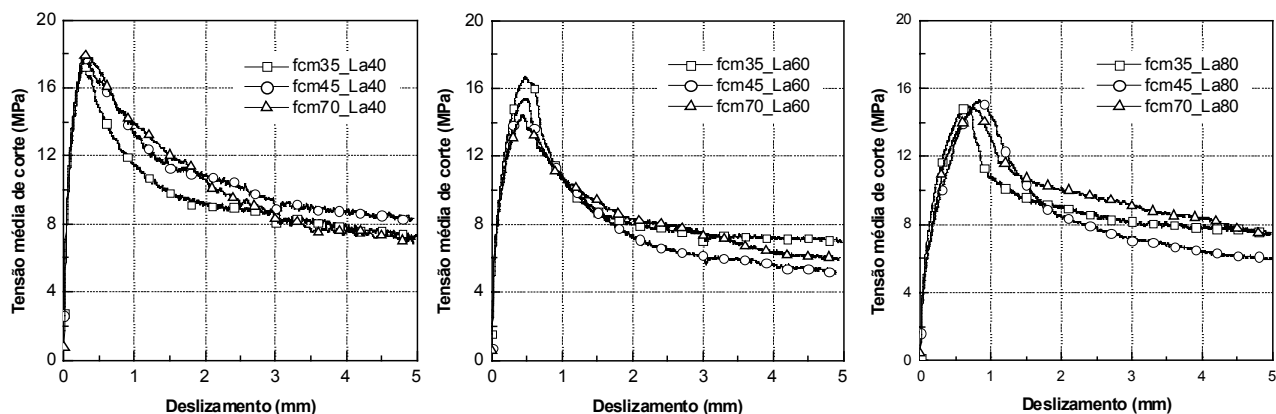


Figura 18 - Influência de La na relação tensão média de corte vs deslizamento.

Da análise das Figuras 15 a 18 e dos resultados incluídos na Tabela 7 constata-se que (Sena-Cruz e Barros (2002b)):

- Aumentando ao comprimento de aderência da LS-CFRP a força na faixa de laminado aumenta;
- A relação $F-s_l$ não é significativamente afectada pela resistência do betão;
- Aumentando ao comprimento de aderência aumenta o deslizamento na fase pré-pico, dado que existe maior volume de adesivo, sendo este um material com elevada deformabilidade não linear (Sena-Cruz *et al.* (2001)). Assim, quanto maior L_a maior foi o deslizamento no pico;
- O τ_{max} diminui com o comprimento de aderência do laminado. A diminuição de τ_{max} é mais significativa entre L_{a40} e L_{a60} do que entre L_{a60} e L_{a80} , indiciando não ser eficaz aumentar significativamente o comprimento de aderência do laminado acima dos 80 mm. Observação similar pode ser extraída da análise dos valores correspondentes a $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$. Em todo o caso, a tensão máxima de corte é significativamente superior à registada em outras configurações de ensaio de arranque (ACI Committee 440 (2002), Juvandes (1999), Dias (2001));
- A relação $\tau-s_l$ não foi significativamente afectada pela resistência à compressão do betão;
- A energia de fractura tem uma tendência para diminuir com o comprimento de aderência do laminado, devido, fundamentalmente, à diminuição da tensão máxima de corte com este comprimento. Contudo, esta diminuição parece tender para uma assíntota, dado o atrito laminado-adesivo-betão garantir um nível de resistência residual elevado.

8 Conclusões

No presente trabalho uma nova técnica de reforço foi utilizada para aumentar a capacidade de carga de elementos de pilar e de viga com rotura por flexão, e de viga com rotura por corte. Esta técnica baseia-se na inserção de faixas de laminados de polímero reforçado com fibras de carbono (LS-CFRP) em entalhes efectuados no betão de recobrimento de peças de betão armado a reforçar. A LS-CFRP é fixa ao betão por intermédio de adesivo epoxi. A ligação (LS-CFRP)-adesivo-betão foi estudada em termos de avaliar a influência do comprimento de aderência do LS-CFRP e da resistência do betão, nos principais parâmetros que permitem caracterizar esta ligação.

Dos resultados obtidos verificou-se que a técnica proposta é mais eficaz que as baseadas na colagem externa de CFRP, dado que a precocidade da descolagem do CFRP é retardada, sendo mesmo evitada em muitos casos, resultando níveis de deformação mais elevados nos CFRP e aumentos mais significativos na capacidade de carga dos elementos reforçados. Nos elementos de viga, além do aumento da capacidade de carga, também se registou um aumento significativo da deformabilidade da estrutura no momento da sua rotura, indicador da eficácia da presente técnica em termos de melhorar o comportamento deste tipo de estruturas no que diz respeito à sua ductilidade.

Os ensaios de arranque em flexão revelaram que as tensões média de corte alcançadas são significativamente superiores às registadas com técnicas baseadas na colagem exterior. Verificou-se que a força de arranque aumentou com o comprimento de aderência e que a relação entre a força de arranque e o deslizamento do LS-CFRP não foi significativamente afectada pela resistência do betão. Os resultados obtidos nestes ensaios vão ser utilizados na definição de uma lei local tensão de corte-deslizamento a ser implementada num elemento de interface que simulará a ligação em causa, no quadro do método dos elementos finitos.

9 Agradecimentos

Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente, Bettor MBT Portugal, Secil, UNIBETÃO (Central de Braga), Solusel, Nordesfer e Ferseque. Ao CEMACON, agradece-se a colaboração prestada nos ensaios de tracção uniaxial com provetes de laminado de CFRP e de adesivo epoxi.

10 Referências

ACI COMMITTEE 440. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI, Technical report, May 118 pp., 2002.

ALKHRDAJI, T. *et al.* **Upgrading the transportation infrastructure: solid RD decks strengthened with FRP**. ACI Concrete International Journal, Vol. 21, No. 10, pp. 37-41, 1999.

BARROS, J.A.O. *et al.* **Análise experimental de pilares de betão armado reforçados com laminados de carbono sob acções cíclicas**. 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Açores, pp. 491-503, 2001.

BARROS, J.A.O.; FORTES, A.S.. **Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits**. 5º Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, 3-6 Junio 2002.

BETTOR MBT Portugal. **Sistema Compósito MBrace**. Fichas técnicas, Lisboa, 1999.

BLASCHKO, M.; ZILCH, K.. **Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits**. Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12, Paris France, 1999.

CEB-FIB. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**. International Federation for Structural Concrete – Technical report, July, 130 pp., 2001.

CHAALLAL, O.. **Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l'aide de résine époxy**. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 212, Novembre/Décembre, pp. 87-93, 1997.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A.; LA TEGOLA, A.. **Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods**. International Meeting on Composite Materials, PLAST, Milan, Italy, May 9-11, 8 pp., 2000a.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A.; LA TEGOLA, A.. **Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods**. Proceedings of the Third International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, Editors: J. Humar and A.G. Razaqpur, 15-18 Aug., pp. 521-528, 2000b.

DIAS, S.J.E.. **Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão**. Tese de Mestrado, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 2001.

DIAS, S.J.E.; BARROS, J.A.O.. **Materias compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado**. Artigo a ser apresentado no 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Agosto de 2003.

EMMONS, P., THOMAS, J., AND SABNIS, G.M.. **New strengthening technology developed – blue circle cement silo repair and upgrade**. Proceedings of the

- International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications, Cairo, Egypt, pp. 97-107, May 28-30 2001.
- EN 10002-1. **Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)** . 35 pp., 1990.
- EN 196-1. **Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength**. 26 pp, 1996.
- FERREIRA, D.R.S.M.. **Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono**. MSc Thesis, Civil Eng. Dep., University of Minho, Portugal, 2000.
- FORTES, A.S.; BARROS, J.A.O.; PADARATZ, I.J.. **Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento**. Relatório 02-DEC/E-13, Universidade do Minho, 32 pp., Junho 2002.
- HOGUE, T.; CORNFORTH, R.C.; NANNI, A.. **Myriad convention center floor system reinforcement**. Proceedings of the FRPRCS-4, C.W. Dolan, S. Rizkalla and A. Nanni Editors, ACI, pp. 1145-1161, 1999.
- ISO 527-3. **Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 5 pp., 1997.
- ISO 527-5. **Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp., 1997.
- JUVANDES, L.F.P.. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. Tese de Doutoramento, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 1999.
- MUKHOPADHYAYA, P.; SWAMY, N.. **Interface shear stress: a new design criterion for plate debonding**. Journal of Composites for Construction, Vol.5, No. 1, February, pp. 35-43, 2001.
- NGUYEN, D.M.; CHAN, T.K.; CHEONG, H.K.. **Brittle failure and bond development length of CFRP-Concrete beams**. Journal of Composites for Construction, Vol.5, No. 1, February, pp. 12-17, 2001.
- PANTUSO, A.; NEUBAUER, U.; ROSTASY, F.S.. **Effects of thermal mismatch between FRP and concrete on bond**. In Minutes of 4th ConcreteFibreCrete Meeting, Lille, France, 2000.
- SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J.A.O.; FARIA, R.M.C.M.. **Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests**. International Conference Composites in Construction, Porto, Portugal, October, pp. 217-222, 2001.
- SENA-CRUZ, J.; BARROS, J.A.O.. **Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento**. Relatório técnico 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 54 pp., Setembro 2002a.
- SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J.A.O.. **Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pullout-bending tests**. Bond in Concrete – from the research to standards, International Symposium, 20-22 November, Budapest, Hungary, pp. 614-621, 2002b.
- TAERWE, L.; KHALIL, H.; MATTHYS S.. **Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets**. Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol. 1, Tokyo, October, pp. 483-490, 1997.

TOUTANJI, H.; BALAGURU, P.. **Durability characteristics of concrete columns wrapped with FRP tow sheets**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 52-57, 1998.

TRIANTAFILLOU, T.. **Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites**. ACI Structural Journal, March-April, pp. 107-115, 1998.

TUMIALAN, G. *et al.*. **Field evaluation of masonry walls strengthened with FRP composites at the malcolm bliss hospital**. Report CIES 99-8, Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 1999.

Warren, G.E.. **Waterfront repair and upgrade, advanced technology demonstration site No. 2: Pier 12, NAVSTA San Diego**. Site Specific Report SSR-2419-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA, 1998.

Warren, G.E.. **Waterfront repair and upgrade, advanced technology demonstration site No. 3: NAVSTA Bravo 25, Pearl Harbour**. Site Specific Report SSR-2567-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA, 2000.